

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.06.028

王笑丛, 金萌萌. 基于重心模型的中国粮食生产与加工时空耦合分析[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(6): 234-239.

WANG X C, JIN M M. The spatio-temporal coupling analysis of grain production and processing based on the center of gravity model[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(6): 234-239.

# 基于重心模型的中国粮食生产与加工时空耦合分析

王笑丛<sup>1</sup>, 金萌萌<sup>2</sup>✉

(1. 国家粮食和物资储备局科学研究院 粮食产业技术经济研究所, 北京 100037;  
2. 中国旅游研究院, 北京 100005)

**摘要:** 保障粮食安全从抓粮食生产向抓粮食产业转型升级转变, 将粮食产业增值收益和粮食产业主体留在产区, 是提高产区种粮积极性的有效手段。采用重心模型, 从全国层面分析 2017—2020 年粮食生产重心与加工重心的演变趋势、时空耦合程度, 评价我国粮食生产和加工耦合协调水平的空间格局。结果表明: 我国粮食生产集聚重心迁移方向整体向北偏西迁移, 粮食加工集聚重心整体向北偏东迁移, 粮食生产和加工的重心总体向北迁移, 具有变动一致性, 粮食加工集聚重心迁移距离要高于粮食生产集聚重心迁移距离。粮食生产与加工集聚重心的空间距离在逐年减小, 粮食产加空间耦合性越来越好。产粮大省要发挥粮食生产优势, 挖掘粮食加工产业发展潜力。

**关键词:** 粮食生产; 粮食加工; 重心模型; 时空迁移; 耦合协调

中图分类号: F320.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)06-0234-06

网络首发时间: 2024-11-13 15:08:05

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20241113.1113.002>

## The Spatio-temporal Coupling Analysis of Grain Production and Processing Based on the Center of Gravity Model

WANG Xiao-cong<sup>1</sup>, JIN Meng-meng<sup>2</sup>✉

(1. Institute of Technology and Economics of the Food Industry, Academy of National Food and Strategic Reserve Administration, Beijing 100037, China; 2. China Tourism Academy, Beijing 100005, China)

**Abstract:** To ensure food security, the focus has shifted from increasing food production to transforming and upgrading the food industry, and retaining the added value of the food industry and its main entities in the production areas is an effective way to increase the enthusiasm for grain production in these areas. Using the gravity model, this study analyzed the evolution trends and spatiotemporal coupling degree of the gravity centers of grain production and processing at the national level from 2017 to 2020, and evaluated the spatial pattern of the coupling and coordination level between grain production and processing in China. The results showed that the agglomeration gravity center of grain production in China has generally shifted northwestward,

收稿日期: 2024-06-19

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (JY2410、JY2417)

Supported by: Fundamental Research Funds of the Central Institutes (No. JY2410, JY2417)

第一作者: 王笑丛, 女, 1989 年出生, 博士, 助理研究员, 研究方向为粮食安全保障战略与粮食产业经济, E-mail: wxc@ags.ac.cn

通信作者: 金萌萌, 女, 1989 年出生, 博士, 研究方向为旅游产业经济, E-mail: jinmengmeng6435@163.com

while the agglomeration gravity center of grain processing has generally shifted northeastward. The gravity centers of grain production and processing have overall shifted northward, showing consistency in their movements, with the migration distance of the agglomeration gravity center of grain processing being greater than that of grain production. The spatial distance between the agglomeration gravity centers of grain production and processing has been decreasing yearly, indicating better spatial coupling between grain production and processing. Major grain-producing provinces should leverage their advantages in grain production and tap into the development potential of the grain processing industry.

**Key words:** grain production; grain processing; the center of gravity model; spatio-temporal migration; coupling coordination

粮食安全是国家经济社会稳定发展的基础。种粮比较效益降低极大影响了种粮积极性。为此,中央制定了最低收购价政策、临时收储措施、农业支持保护补贴等一揽子粮食生产支持政策<sup>[1]</sup>。然而,长远来看应提高种粮积极性的“造血”能力,将粮食生产支持政策体系重心转到支持主产区粮食产业集群和粮食产业经济发展上去。大力发展粮食加工业,引导粮食产业链向主产区、产粮大县集中,形成粮食产业集群效应,促进就地、就近转化增值,实现粮食增产与粮食产业增值有机统一,加快粮食产区兴粮富民步伐。基于此,评估我国粮食生产和加工的耦合协调水平的空间格局具有重要的现实意义。

近年来,大量研究探讨分析粮食生产与多种因素之间的时空关系,包括经济发展<sup>[2-4]</sup>、农民收入<sup>[5-6]</sup>、粮食安全<sup>[7-8]</sup>、生态<sup>[9-10]</sup>、资源系统<sup>[11-13]</sup>等。然而,这些研究忽视了粮食生产和加工的耦合协调对粮食安全和粮食产业发展的重要性。研究常用重心转移模型<sup>[2-3,6]</sup>、不均衡指数<sup>[2]</sup>、空间自相关<sup>[3,7]</sup>、空间一致性模型<sup>[3]</sup>、DEA-CCR 模型<sup>[14]</sup>等方法分析粮食生产与其他因素间的时空关系。

因此,研究以我国 31 个省份的粮食产业作为研究对象,使用重心耦合模型、空间一致性模型,分析 2017—2020 年粮食生产和加工的时空演变特征及二者间的耦合关系,并提出优化粮食生产加工时空耦合的针对性建议,以期实现粮食加工产业在粮食产区的集聚和协同动态发展。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源及说明

本文选取小麦、稻谷、玉米、大豆 4 大粮食

作物作为研究对象,分析我国主要粮食产加耦合状况。我国 31 个省份的粮食产量(下面简称产粮量)数据来自 2017—2020 年《中国统计年鉴》,加工产业粮食使用量(下面简称用粮量)数据来自 2017—2020 年《粮食行业统计资料》。通过 ArcGIS10.6 软件从行政区数据中提取各个省份的几何重心,根据该数据测算各个省份 2017—2020 年的粮食生产重心、粮食加工重心和产加耦合状况。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 重心转移模型

重心转移模型可分析区域某种属性的空间重心区域变化大小与迁移方向。本文采用该模型分析我国粮食生产和加工的重心转移路径。具体公式如下所示:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad \text{式 (1)}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad \text{式 (2)}$$

$$d_{i-j} = c \times \sqrt{(\bar{x}_i - \bar{x}_j)^2 + (\bar{y}_i - \bar{y}_j)^2} \quad \text{式 (3)}$$

$$P_{i-j} = \frac{\bar{y}_i - \bar{y}_j}{\bar{x}_i - \bar{x}_j} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad \text{式 (4)}$$

式(1)~(2)中,  $(\bar{x}, \bar{y})$  为某省份的重心坐标,  $m_i$  为该省份的属性数据,如产粮量、用粮量。式(3)中,  $d_{i-j}$  表省份不同年份间的重心迁移距离;  $i, j$  分别表示不同年份;  $(\bar{x}_i, \bar{y}_i)$

分别表示*i*年份重心坐标；*c*为地理坐标转化为平面距离的系数，取常数 111.111。式（4）中， $p_{i-j}$ 表示某省份不同年份间的重心迁移方向； $\Delta x$ 表示经度上的变化速度， $\Delta y$ 表示纬度上的变化速度<sup>[6]</sup>。

### 1.2.2 空间耦合模型

$$s_i = \sqrt{(\bar{x}_{mi} - \bar{x}_{ni})^2 + (\bar{y}_{mi} - \bar{y}_{ni})^2} \quad \text{式 (5)}$$

$$v_i = \frac{(\Delta \bar{x}_{mi} \times \Delta \bar{x}_{ni} + \Delta \bar{y}_{mi} \times \Delta \bar{y}_{ni})}{\sqrt{(\Delta \bar{x}_{mi}^2 + \Delta \bar{y}_{mi}^2)(\Delta \bar{x}_{ni}^2 + \Delta \bar{y}_{ni}^2)}} \quad \text{式 (6)}$$

式（5）反映空间重叠性， $s_i$ 为某省份第*i*年粮食生产与加工重心的空间距离，其值越小则空间重叠性越高、耦合性越好、*n*分别表示产粮量和用粮量； $(\bar{x}_{mi}, \bar{y}_{mi})$ 、 $(\bar{x}_{ni}, \bar{y}_{ni})$ 分别表示某省份第*i*年粮食生产重心与加工重心的地理坐标。式（6）中， $v_i$ 为某省份第*i*年粮食生产与加工重心变动的一致性指数，大小为[-1,1]，其绝对值越大则变动越趋于一致，值为正则变动方向相同，反之则相反； $\Delta \bar{x}_i$ 、 $\Delta \bar{y}_i$ 分别表示第*i*年与第*i*-1年重心的经度、纬度变化量。

### 1.2.3 空间一致性模型

$$CGP_i = \frac{GPO_i / \sum GPO_i}{GRA_i / \sum GRA_i} = \frac{GPO_i \times \sum GRA_i}{GRA_i \times \sum GPO_i} \quad \text{式 (7)}$$

式（7）中， $CGP_i$ （Coupling of grain and processing）为某年份*i*省份的粮食生产与加工一致性系数，分为五个区间<sup>[15]</sup>； $GRA_i$ 、 $GPO_i$ 分别为*i*省份的产粮量与用粮量。

## 2 粮食生产和加工重心变动轨迹分析

### 2.1 粮食生产重心分布及变化轨迹

根据重心转移模型测算出 2017—2020 年我国粮食生产集聚重心迁移方向和移动距离（表 1 所示）。我国粮食生产集聚重心向北偏西方向迁移。粮食生产集聚重心由 2017 年位于东经 115.428°E、北纬 35.896°N（山东省莘县）移动到 2020 年的东经 115.397°E、北纬 35.994°N（河南省清丰县），向西迁移 0.031°，向北迁移 0.097°。粮食生产集聚南北分布变化程度高于东西分布变化，向北偏西迁移 11.373 km。

4 种粮食作物集聚重心迁移方向存在较大差异，但整体向东北方向迁移。2017—2020 年我国小麦生产集聚重心由河南省获嘉县（35.121°N，113.662°E）向东偏南迁移至河南省原阳县（35.068°N，113.762°E）。稻谷由河南省潢川县（32.330°N，115.277°E）向东偏北迁移至河南省淮滨县（32.437°N，115.408°E）。玉米由河北省雄县（38.943°N，116.222°E）向西偏北迁移至河北省安新县（38.968°N，115.873°E）。大豆由辽宁省建昌县（40.680°N，119.601°E）向东偏北迁移至辽宁省朝阳县（41.218°N，120.140°E）。

4 种粮食作物集聚重心迁移距离存在显著差异。2017—2020 年我国小麦、稻谷、玉米、大豆生产集聚重心迁移距离分别为 12.606、18.766、38.828、84.609 km。相较于稻谷和小麦，大豆的迁移距离最大，其次是玉米。

表 1 2017 年和 2020 年我国粮食生产重心分布  
Table 1 The distribution of grain production center of gravity in China in 2017 and 2020

作物种类	年份	纬度 (°N)	经度 (°E)	迁移距离/km	迁移方向
粮食生产	2017 年	35.896	115.428	11.373	向北偏西
	2020 年	35.994	115.397		
小麦生产	2017 年	35.121	113.662	12.606	向东偏南
	2020 年	35.068	113.762		
稻谷生产	2017 年	32.330	115.277	18.766	向东偏北
	2020 年	32.437	115.408		
玉米生产	2017 年	38.943	116.222	38.828	向西偏北
	2020 年	38.968	115.873		
大豆生产	2017 年	40.680	119.601	84.609	向东偏北
	2020 年	41.218	120.140		

### 2.2 粮食加工整体重心分布及变化轨迹

根据重心转移模型测算 2017—2020 年我国粮食加工集聚重心迁移方向和移动距离（表 2 所示）。我国粮食加工集聚重心整体呈现向北偏东的迁移趋势。粮食加工集聚重心由 2017 年位于东经 116.437°E、北纬 34.466°N 移动到 2020 年的东经 116.756°E、北纬 35.218°N，粮食生产集聚重心向西迁移 0.318°，向北迁移 0.753°。粮食生产集聚南北分布变化程度高于东西分布变化，向北偏东迁移 90.81 km。

4种粮食作物加工集聚重心均向北迁移。2017—2020年我国小麦加工集聚重心由河南省睢县(34.263°N, 115.018°E)向西偏北迁移至河南省杞县(34.485°N, 114.781°E)。稻谷由安徽省埇桥区(33.731°N, 117.143°E)向北偏东迁移至山东省兰陵县(34.77°N, 118.126°E)。玉米由山东省岱岳区(35.979°N, 116.987°E)向北偏东迁移至山东省济阳区(37.081°N, 117.308°E)。大豆由安徽省霍邱县(32.233°N, 116.023°E)向北偏东迁移至安徽省颍上县(32.602°N, 116.115°E)。

4种粮食作物加工集聚重心迁移距离略有不同。2017—2020年我国小麦、稻谷、玉米、大豆加工集聚重心迁移距离分别为36.105、158.972、127.49、42.19 km。稻谷和玉米的加工集聚重心的迁移距离明显高于小麦和大豆。

表2 2017和2020年我国粮食加工重心分布  
 Table 2 The distribution of grain processing center of gravity in China in 2017 and 2020

作物种类	年份	纬度 (°N)	经度 (°E)	迁移距离/ km	迁移方向
粮食加工	2017年	34.466	116.437	90.810	向北偏东
	2020年	35.218	116.756		
小麦加工	2017年	34.263	115.018	36.105	向西偏北
	2020年	34.485	114.781		
稻谷加工	2017年	33.731	117.143	158.972	向北偏东
	2020年	34.770	118.126		
玉米加工	2017年	35.979	116.987	127.491	向北偏东
	2020年	37.081	117.308		
大豆加工	2017年	32.233	116.023	42.190	向北偏东
	2020年	32.602	116.115		

### 3 粮食生产与加工发展的空间耦合关系

#### 3.1 粮食生产和加工重心耦合分析

##### 3.1.1 空间重叠性

粮食生产重心一直位于粮食加工重心的西北方向。粮食生产与加工集聚重心的空间距离由2017年的1.751 km下降到2020年的1.564 km(表3所示),粮食生产空间重叠性越来越高、耦合性越来越好,在2019年增长幅度最大。

从空间距离大小来看,4种粮食作物有梯度。小麦产加集聚重心的空间距离最小,空间距离介于1~2之间,重叠性最高。稻谷空间距离介于2~4

之间,重叠性较高。玉米空间距离介于2~3.5之间,重叠性也较高。大豆空间距离介于8~10之间,重叠性相对较低。

从空间距离变化幅度来看,4种粮食作物有差异。小麦产加集聚重心的空间距离变化幅度呈逐年递增的趋势,由0.057 km增至0.188 km,重叠性逐年增加。玉米产加集聚重心的空间距离变化幅度高于小麦,由0.052 km增至0.277 km,重叠性程度显著。稻谷生产与加工空间重叠性越来越低,空间距离变化幅度波动变化,空间距离不断加大。大豆生产与加工空间距离变化幅度波动变化,重叠性先高后低。

表3 2017—2020年我国粮食生产与加工空间重叠性  
 Table 3 The spatial overlap between grain production and processing in China from 2017 to 2020

作物种类	2017年	2018年	2019年	2020年
粮食	1.751	1.778	1.606	1.564
小麦	1.605	1.547	1.362	1.174
稻谷	2.333	2.887	3.015	3.583
玉米	3.061	3.009	2.648	2.371
大豆	9.174	8.858	8.977	9.510

##### 3.1.2 变动一致性

粮食生产重心与粮食加工重心的变动一致性在正负之间波动(表4所示)。从南北来看,虽然粮食生产和加工的重心总体向北迁移,但具体迁移路径存在较大差异,粮食生产集聚重心向北迁移0.097°,而粮食加工集聚重心向北迁移0.753°。从东西方向来看,粮食生产集聚重心向西迁移,而粮食加工集聚重心向东迁移。

表4 2018—2020年我国粮食生产与加工变动一致性  
 Table 4 The variation consistency between grain production and processing in China from 2018 to 2020

作物种类	2018年	2019年	2020年
粮食	-0.313	0.885	-0.308
小麦	-0.746	-0.831	-0.772
稻谷	-0.983	0.966	0.998
玉米	0.832	0.798	-0.204
大豆	0.979	0.961	0.966

分品种来看,4种粮食作物变动一致性指数差异较大。小麦的生产与加工重心变动一致性为负,变动一致性指数绝对值高于0.7,空间耦合性

较差且产加重心呈“东南-西北”反向移动。大豆的生产与加工重心变动一致性为正，变动一致性指数高达 0.9，空间耦合性较好，均向东北方向移动。而稻谷和玉米生产与加工重心变动一致性在正负之间波动。稻谷生产和加工重心先是方向相反，在 2019 年变为方向相同。玉米生产和加工重心先是方向一致，在 2020 年变为反方向。

### 3.2 粮食生产和加工发展的空间一致性分析

粮食生产和加工的空间一致性系数 (Coupling of grain and processing, CGP) 越低，则粮食生产优势没有充分发挥，粮食加工产业存在较大发展空间。主产区中内蒙古和四川的粮食加工集聚水平低于粮食生产集聚水平，山东和江苏的粮食加工集聚水平高于粮食生产集聚水平。为了深入了解我国粮食产加耦合性，分品种对粮食产量前十省份的 CGP 进行分析。对于小麦，7 省份的 CGP 大于 1.2，小麦加工产业相较其他品种粮食集聚效果较强；河北的小麦加工集聚水平高于小麦生产集聚水平，加工产业发展较好；甘肃、新疆的 CGP 较低，粮食加工产业具有一定的发展潜力。对于玉米和大豆，6 省份的 CGP 大于 1.2，加工产业集聚效果较强。对于稻谷，2 省份 CGP 大于 1.2，5 省份 CGP 处于[1.2, 2]之间，1 省份 CGP 处于[0.8, 1.2]之间，稻谷生产和加工产业耦合性较差。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

我国粮食生产和加工产业重心北移趋势明显，加剧了粮食产业南北发展的不平衡。南部区域要加强粮食安全保障体系建设。守好耕地和永久基本农田保护红线。积极推动高标准农田建设，提升南部耕地质量。跨区域建设粮食产加销一体化发展中心，提升生产和加工效率，减少运粮损耗，创新订单农业等产加销协同发展模式。产粮大省要发挥粮食生产优势，挖掘粮食加工产业发展潜力。湖北、江苏、新疆、甘肃要加强小麦加工产业发展，湖南、四川、广东、广西要加强稻谷加工产业发展。同时，随着大豆生产重心向东北方向迁移，黑龙江、吉林等要加强大豆加工产业发展。

### 4.2 结论

我国粮食生产集聚重心向北偏西迁移。4 种粮食作物生产集聚重心迁移方向存在较大差异，小麦向东偏南迁移，稻谷和大豆向东偏北迁移，玉米向西偏北迁移。其中大豆的迁移距离最大，其次是玉米。我国粮食加工集聚重心整体向北偏东迁移。4 种粮食作物加工集聚重心均向北迁移，除小麦向西偏北迁移，稻谷、玉米和大豆均向北偏东迁移。且小麦、稻谷和玉米的加工迁移距离明显高于其生产迁移距离。

粮食生产与加工集聚重心的空间距离在逐年减小，粮食产加空间重叠性越来越高、耦合性越来越好。其中小麦产加空间重叠性最高，玉米产加空间重叠性逐年增高，稻谷产加空间重叠性逐年降低，而大豆产加空间重叠性最低。

粮食生产和加工的重心总体向北迁移，变动具有一致性，但粮食生产集聚重心向北偏西迁移，而粮食加工集聚重心向北偏东迁移。从省份来看，主产区中内蒙古和四川的粮食产加空间一致性较差，粮食生产优势没有充分发挥，粮食加工产业存在较大的发展空间。从粮食种类来看，小麦、玉米和大豆的产加空间一致性表现出较高水平，而稻谷在空间上产加一致性水平较低。

### 参考文献：

- [1] 朱满德, 程国强. 提高种粮积极性: 中国粮食生产支持政策的完善与转型[J]. 中州学刊, 2023(12): 61-69.  
ZHU M D, CHENG G Q. Improving farmers' enthusiasm for grain production: The improvement and transformation of China's grain production support policy[J]. Academy Journal of Zhongzhou, 2023, 12: 61-69.
- [2] 陆婷婷, 夏四友. 江苏省粮食生产与经济发展时空耦合与优化策略[J]. 东北农业科学, 2020, 45(2): 95-100.  
LU T T, XIA S Y. Spatiotemporal coupling and optimization strategies of grain production and economic development in Jiangsu Province[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2020, 45(2): 95-100.
- [3] 谢坤, 丁明军, 辛良杰, 等. 中国县域粮食产量的时空格局及其与经济空间关系[J]. 经济地理, 2021, 41(11): 167-175.  
XIE K, DING M J, XIN L J, et al. Spatial-temporal patterns of grain output and its spatial relationship with economic development at the county level in China[J]. Economic Geography, 2021, 41(11): 167-175.

- [4] 殷伟, 姚成胜, 黄琳. 我国粮食生产与经济发展耦合协调性的时空演变[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(11): 110-121.  
YIN W, YAO C S, HUANG L. Spatial-temporal evolution of coupling coordination of grain production and economic development in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(11): 110-121.
- [5] 齐蘅, 吴玲. 我国粮食主产区粮食生产与收入水平的协调度分析[J]. 经济地理, 2017, 37(6): 156-163.  
QI H, WU L. Analysis on coordination degree of grain production pattern and income level in main producing areas of China[J]. Economic Geography, 2017, 37(6): 156-163.
- [6] 刘竞文. 中国农业集聚重心与农民收入重心变动研究——基于粮食类农作物空间布局变化的实证检验[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(12): 64-73.  
LIU J W. Study on the change of center of agricultural agglomeration and peasants' income in China: Empirical test based on spatial distribution of grain crops[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017, 38(12): 64-73.
- [7] 刘苗苗, 潘佩佩, 任佳璇, 等. 京津冀粮食安全与农业用水安全耦合协调研究[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(2): 170-182.  
LIU M M, PAN P P, REN J X, et al. Coupling coordination of food security and agricultural water security in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(2): 170-182.
- [8] 刘玉洁, 张安录, 刘蒙罢. 长江中下游粮食主产区城镇化与耕地利用生态效率耦合协调度时空格局分析[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(8): 106-118.  
LIU Y J, ZHANG A L, LIU M B. Analysis on the spatiotemporal pattern of coupling degree of urbanization and cultivated land Use eco-efficiency in main grain producing areas in the mid and lower reaches in Yangtze River[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43(8): 106-118.
- [9] 李明月, 周晓航, 周艺霖, 等. 粮食主产区农业生态效率与新型城镇化耦合协调研究[J]. 生态经济, 2022, 38(11): 130-137.  
LI M Y, ZHOU X H, ZHOU Y L, et al. Research on coupling and coordination of agricultural eco-efficiency and new urbanization in main grain production areas[J]. Ecological Economy, 2022, 38(11): 130-137.
- [10] 薛选登, 马路. 粮食主产区土地生态与粮食安全耦合协调性分析[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(9): 1-11.  
XUE X D, MA L. Analysis on the coupling and coordination of land ecological and food security in main grain production areas[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43(9): 1-11.
- [11] 王勇, 孙瑞欣. 土地利用变化对区域水—能源—粮食系统耦合协调度的影响——以京津冀城市群为研究对象[J]. 自然资源学报, 2022, 37(3): 582-599.  
WANG Y, SUN R X. Impact of land use change on coupling coordination degree of regional water-energy-food system: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(3): 582-599.
- [12] 何慧爽, 原雷雷. 我国粮食主产区水—能源—粮食耦合协调发展分析与预测[J]. 生态经济, 2021, 37(6): 102-108.  
HE H S, YUAN L L. Analysis and prediction of water-energy-food coupling and coordinated development in the main grain-producing areas in China[J]. Ecological Economy, 2021, 37(6): 102-108.
- [13] 何淑婷, 王秀丽, 李程秀, 等. 河南省水—能源—粮食—土地系统耦合协调性研究[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(12): 116-130.  
HE S T, WANG X L, LI C X, et al. Study on the coupling coordination of water-energy-food-land system in Henan Province [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(12): 116-130.
- [14] 王金伟, 孙洁, 雷婷, 等. 中国粮食生产效率与旅游发展的耦合机制及时空分异[J]. 自然资源学报, 2022, 37(10): 2651-2671.  
WANG J W, SUN J, LEI T, et al. Coupling mechanism and spatiotemporal differentiation between grain production efficiency and tourism development in China[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(10): 2651-2671.
- [15] 杨慧, 渠丽萍, 杨保战, 等. 粮食与经济中心迁移路径及空间耦合关系分析——以湖北省粮食主产县为例[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(12): 40-47.  
YANG H, QU L P, YANG B Z, et al. Analysis on migration path of grain and economic center of gravity and spatial coupling relationship[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(12): 40-47. 完